DOI:10.11931/guihaia.gxzw202411022

气候变化下喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园的扩散风险研究

陈芷琪[1]，杨泽秀[2]，宋希强[1,2]，杨帆[1*]

（1. 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室/海南大学热带农林学院，海南大学，海口 570228；2. 海南省珠峰林业生态研究所，海口 570220）

摘　要：喜旱莲子草（*Alternanthera philoxeroides*）在全球范围内广泛入侵，给当地生态环境带来严重威胁。海南热带雨林国家公园作为生物多样性保护的关键区域，正面临着喜旱莲子草扩散传播的风险，因此，准确掌握其分布情况并开展动态监测至关重要。该研究通过野外实地调查收集数据，采用 R 语言的 Biomod2 程序包建立物种分布模型，分析喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园当前及未来气候模式下的空间分布及关键环境影响因素。结果表明：（1）喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园的适生区分为低、中、高和非常适宜适生区，当前时期的高度适宜面积约为 180.75 km^2，主要集中于鹦哥岭、吊罗山及黎母山片区。（2）参与模型预测的各类因子中，气候因子对喜旱莲子草生境适宜性的影响最为显著。在 11 个环境变量中，年均温变化范围（bio7）、植被归一化指数（ndvi）、最暖月最高温度（bio5）和最暖季度降水量（bio18）是影响喜旱莲子草生境适宜性的关键环境因子。（3）在未来不同气候情景预测下，喜旱莲子草总适生区变化趋势呈现出两种不同的态势，但质心变化均呈现向东移趋势。与温和可持续发展情景（SSP126）相比，在高排放、极端气候加剧情景（SSP585）下，喜旱莲子草的适生区扩张更为迅速。综上结果表明，当前气候下喜旱莲子草的潜在适生区域主要集中在国家公园的边界区域。未来全球极端气候增多及环境剧烈变动将增加其在国家公园内的扩散风险。持续开展喜旱莲子草的动态监测，掌握其入侵和扩散态势，是有效管理并预防喜旱莲子草在国家公园大面积扩散的重要举措。

关键词：Biomod2 模型，外来入侵植物，潜在分布，环境因子，国家公园

中图分类号：Q948　　　　　　　　**文献标识码：**A

Dispersal risk of *Alternanthera philoxeroides* in Hainan Tropical Rainforest National Park under climate change

CHEN Zhiqi[1], YANG Zexiu[2], SONG Xiqiang[1,2], YANG Fan[1*]

（1. *Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education/School of Tropical Agriculture and Forestry*, *Hainan University*, Haikou 570228, China; 2. *Zhufeng Forestry Ecology Research Institute of Hainan*, Haikou 570220, China）

Abstract: *Alternanthera philoxeroides*, a globally invasive species, poses a significant threat to local ecosystems due to its rapid spread and adaptability to diverse environmental conditions. Hainan Tropical Rainforest National Park, a critical area for biodiversity conservation, is increasingly at risk from the spread of *A. philoxeroides*. Therefore, accurately mapping its distribution and conducting dynamic monitoring are essential for effective management. This study utilized field survey data and employed the Biomod2 package in the R programming language to develop species distribution models, analyzing the spatial distribution of *A. philoxeroides* in the national park under current and future climate scenarios, as well as identifying key environmental factors influencing its habitat suitability. The results were as follows: (1) The suitable areas for *A. philoxeroides* in the national park were categorized into low, medium, high, and very suitable zones. Under current conditions, the

---

基金项目：国家自然科学基金(32371959)；海南省林业局资助项目(HDZB-2023-071)。

第一作者：陈芷琪(2000—)，硕士研究生，主要研究方向为热带植物园林应用与评价，(E-mail) zhiqishiyuchen@163.com。

***通信作者：**杨帆，博士，副教授，研究方向为生物入侵与林业健康管理，(E-mail) fanf_yang@hainanu.edu.cn。

highly suitable area covered approximately 180.75 km², concentrated primarily in the Yinggeling, Diaoluoshan, and Limushan areas. (2) Among the various factors influencing habitat suitability, climatic variables were found to have the most significant impact on the species' distribution. Specifically, the mean annual temperature change (bio7), normalized difference vegetation index (ndvi), maximum temperature in the warmest month (bio5), and precipitation in the warmest quarter (bio18) were identified as the key factors influencing habitat suitability. (3) The trends in the total habitat suitability area of *A. philoxeroides* under different future climate scenarios revealed two distinct patterns. In both scenarios, the centroid of suitable habitat shifted eastward. Under the high emissions, extreme climate intensification scenario (SSP585), the expansion of suitable habitat was more rapid compared to the moderate sustainable development scenario (SSP126). In conclusion, the projected habitat of *A. philoxeroides* under current climate conditions is primarily located on the periphery of the national park. However, due to the expected dramatic changes in global climate, the risk of its spread within the national park is significantly heightened. Continuous monitoring and proactive management are crucial to prevent the large-scale invasion of *A. philoxeroides* and mitigate its ecological impacts.
Key words: Biomod2 model, invasive alien plants, potential distribution, environmental factors, national park

入侵植物通常具有适应能力强、繁殖率高、生态位广泛和传播途径多样等特征，对入侵生态系统的结构与功能构成了严重威胁。大量研究表明，入侵植物显著抑制了本地植物的生长，甚至可能导致某些本地物种的灭绝（Rai & Singh, 2020；张慧斌和张翼，2024）。我国地域辽阔，地理和气候环境复杂多样，大多数外来物种在我国境内均有其适生区（王运生，2007）。随着中国经济的快速发展和全球化进程的加深，生物入侵问题日益严峻，我国已成为世界上生物入侵最为严重的国家之一（吴甜等，2024）。据《2020 中国生态环境状况公报》显示我国外来入侵物种已超过 660 种，219 种外来入侵物种在国家级自然保护区定殖（中华人民共和国生态环境部，2021）。这些物种不仅入侵范围广、危害严重，且种类数量还在逐年攀升（焦鑫宇等，2024）。设立自然保护区、国家公园等方式是我国生物多样性保护采取的直接保护措施之一（蔡颖莉等，2024）。自然保护地通常被认定为具有较高的生物多样性，与保护区域生物多样性有着密不可分的联系，然而诸多研究表明，众多自然保护地正面临日益严峻的外来物种入侵风险。宫璐等（2017）研究表明已有 176 种入侵植物在我国 53 个自然保护区分布，隶属于 43 个科。张莹璐等（2023）研究表明大熊猫国家公园中两个片区共有入侵植物 48 种，隶属于 17 科 37 属。随着人为活动对保护区外围边界区域干扰加剧，物种入侵的可能性大幅提升，对于自然保护地的物种保护造成巨大的负面影响（邵小明，2024）。因此，对于自然保护地内入侵植物的潜在适生区域进行预测研究，显得尤为迫切和重要。

喜旱莲子草（*Alternanthera philoxeroides*）自 2003 年被国家环保总局列入首批外来入侵物种名录以来（国家环保总局，2003），作为典型的恶性入侵植物，因其广泛的入侵范围和对入侵地生态系统的严重危害而备受关注（侯清晨等，2022）。喜旱莲子草凭借其强大的环境耐受性和快速适应能力，迅速扩张并抢占资源，成为受干扰群落中的优势种（唐梦娥等，2020）。海南热带雨林区域，作为南渡江、昌化江、万泉河等水系及松涛、大广坝等重要水库的源头，承载着“绿肺”与“水塔”的双重生态功能，对维护海南岛的生态安全与可持续发展具有不可估量的价值（杜乐山等，2023）。海南热带雨林国家公园的正式设立，标志着园区内关键物种和生物多样性保护要求的继续提升。在此背景下，有效防范外来物种入侵对保护区的生态威胁，成为亟待解决的关键议题。

物种分布模型近年来成为生物地理学、生态学、保护生物学和气候变化等研究中的核心分析工具（梁键明等，2023）。各种学者运用不同的物种分布模型预测各种外来入侵植物的潜在分布情况，如紫茎泽兰（*Ageratina adenophora*）（Wang & Wang, 2006；李双成和高江波，2008）、肿柄菊（*Tithonia diversifolia*）（陈剑等，2021）、反枝苋（*Amaranthus retroflexus*）（Qin et al., 2018）、互花米草（*Spartina*

alterniflora）（刘亚静等，2024）。然而，当前物种分布模型种类繁多，原理和算法各异，使用单一模型或难以确保预测的精准度（Segurado & Araújo, 2004）。而通过融合不同模型的预测结果，构建集合模型可望有效提高预测能力（王子文等，2023）。

基于此，本研究拟采用物种分布模型 Biomod2，以海南热带雨林国家公园为研究区域，基于野外实地调查的喜旱莲子草分布数据，预测其在国家公园区域尺度下的不同气候情境下的地理空间分布，探讨其在海南热带雨林国家公园的扩散风险，并分析影响喜旱莲子草空间分布的关键环境因素。研究结果将为喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园的预警、监测和防治提供科学参考。

1　材料与方法

1.1 物种分布数据获取

喜旱莲子草数据全部来自海南热带雨林国家公园的水生植物资源野外实地调查。调查沿国家公园内河流的河岸带进行，每 5 km 设计一个调查断面，重点分布于河流上中下游或交汇处，各断面设一条 800 m 长的样线，样线头、中、尾各设一个 2 m×2 m 的样方。湖泊和水库则按入口、出口、沿岸带等区域划分，每区域设 1~2 个具有代表性的横断面（库容量小于 1 000 万 m^3 的水库，每个区域布设 1 个横断面），横断面内设 1~2 条 800 m 样线，同样在样线头、中、尾设置 2 m×2 m 的样方。使用 GPS（Global positioning system）全球定位系统获取植物分布经纬度，所有分布点的经纬度输入 Excel 表格并保存为“.CSV”格式。植物分布点位利用物种分布模型工具箱（SDM Toolbox）对分布数据进行筛选，最终得出喜旱莲子草的分布点共 10 个（图 1）。

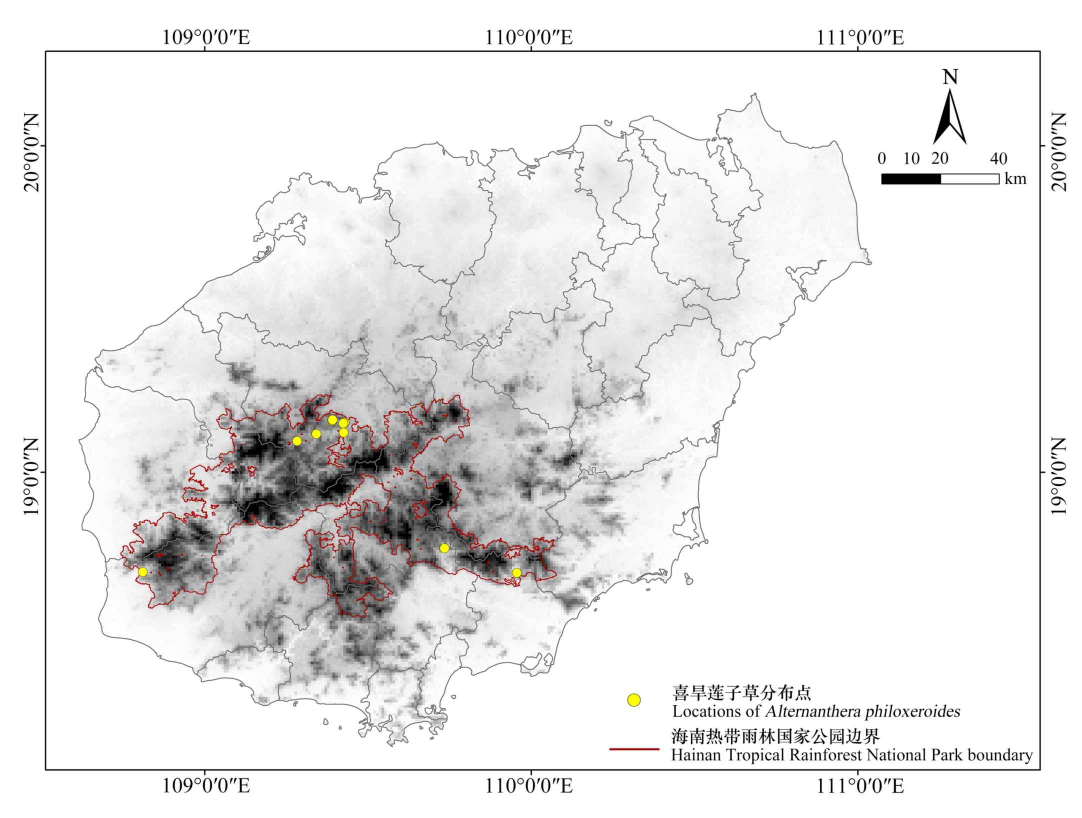


图 1　喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园的分布点位

Fig. 1 Distribution points of *Alternanthera philoxeroides* in Hainan Tropical Rainforest National Park

1.2 环境数据获取与处理

参与模型模拟的环境变量包括地形因子、土壤因子、气候因子、地表太阳辐射量和植被归一化指数数据。地形因子来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，包含海拔、坡度和坡向 3 个变量，空间分

辨率为 12.5 m 的 DEM 数据。土壤因子数据来源于世界土壤数据库（HWSD）的中国土壤数据集（v2.0），经过提取与整理，选择个 17 土壤因子变量，分辨率为 1 km。气候数据来源于世界气候数据库（http://www.worldclim.org/），分辨率为 30″（约 1 km）。气候数据包中包含了 19 个生物气候变量。当前和未来气候数据使用基于 CMIP6 的 WorldCLim2.1 数据集，其中 2041—2060 年（2050s）、2061—2080 年（2070s）和 2081—2100 年（2090s）3 个时期分别选择 SSP126 和 SSP585 这 2 个气候情景进行预测。其中，SSP126 情景代表了温和可持续发展情景，SSP585 则代表了高排放、极端气候加剧情景。地表太阳辐射量数据来源于 Google Earth Engine 数据平台（https://code.earthengine.google.com/）。植被归一化指数数据来自于国家生态科学数据中心（http://www.nesdc.org.cn/）。将选择的 41 个环境变量数据的图层文件用 Arcgis10.8 进行重采样统一栅格大小，统一地理坐标系统，统一分辨率为 1 km。

为了消除共线性对建模过程和结果解释的影响，使用 R4.2.2 软件对预选环境变量实施进行 Pearson 相关性分析，剔除了预实验中高相关性（$|r|\geqslant 0.8$）变量中贡献度较低者，最后保留相关性$|r|<0.8$（Zhuo et al., 2020）且贡献率较高的 11 个环境变量用于后续建模（表 1）。

表 1 模型采用环境变量表

Table 1 The model uses a table of environmental variables

环境变量 Environmental variable	描述 Describe	代号 Code
气候变量 Climate variable	平均气温日较差 Mean diurnal range（℃）	bio2
	最暖月最高温度 Max temperature in the warmest month（℃）	bio5
	年均温变化范围 Annual mean temperature range（℃）	bio7
	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter（mm）	bio18
土壤变量 Soil variable	沙含量 Sand content（% weight）	sand
	土壤酸碱度 Soil pH	ph_water
	土壤碳氮比 Soil C/N Ratio	cn_ratio
地形变量 Terrain variable	海拔 Altitude（m）	altitude
	坡向 Aspect（°）	aspect
其他变量 Other variable	地表太阳辐射量 Surface solar radiation（$MJ.m^{-2}$）	srad
	植被归一化指数 Normalized difference vegetation index	ndvi

1.3 模型筛选

利用 R 包“biomod2”程序包的 9 个模型进行单个模型建模。首先，使用 9 个模型进行单个模型建模，设置 75%的分布点，数据进行模型训练，25%分布数据进行模型验证，随机生成 1 000 个伪分布点，重复运行模型 5 次（Zhao et al., 2021），并使用 TSS 值指标评估模型的准确性（Phillips et al., 2006）。真实技巧统计值（True skill statistic, TSS）利用分布点和伪分布点计算模型的净预测成功率，TSS 在[-1, 1]区间取值，当值越接近 1 表示模型的预测精度越高，越接近-1 表示模型趋于随机模型（Allouche & Kadmon, 2006）。根据单一模型建模结果筛选 TSS 值高于 0.8 的优质模型作为基础模型，借助“biomod2”包进行组合构建组合模型框架（Huang et al., 2023）。最终，运用最优的组合模型算法，针对当前与未来不同气候情景，分别预测喜旱莲子草的集合模型分布结果。

1.4 可视化分析

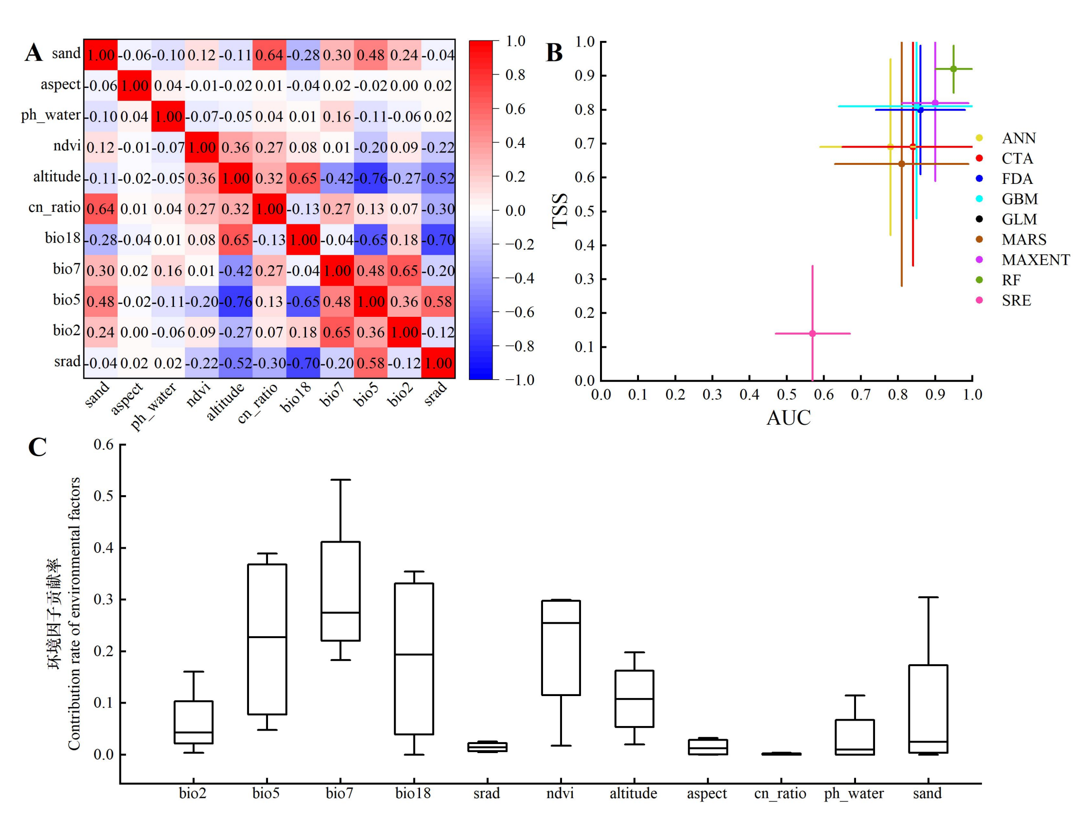
将各时期下创建的基于 Biomod2 模型投影结果作为喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园的适生区分布图。将预测的适生区划分为 0~1 的形式，将物种适生的适宜程度划分为 4 个适生等级结果：0~0.2 为低度适宜；0.2~0.4 为中度适宜；0.4~0.6 为高度适宜；0.6~1 为非常适宜。中、高、非常适宜 3 个等级之和

为总适生区。使用 SDM Toolbox 计算不同时期各适生区面积变化和总适生区质心变化情况，通过 Arcgis10.8 对结果进行可视化表达（陈勤等，2022）。

2 结果与分析

2.1 环境变量和模型筛选及重要性评估

基于环境因子相关性分析和预实验中各个环境变量对模型的贡献率，最终保留 11 种环境变量参与最终模型运行（图 2：A）。对运行成功的 9 种模型筛选 TSS 值高于 0.8 的模型进行组合（图 2：B），最终喜旱莲子草组合模型的 TSS 值为 0.996、AUC 值为 0.998；均达到优秀标准，且高于所有单一模型，表明组合模型对预测喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园的潜在分布结果更为准确和可信。利用 R 语言“biomod2”程序包运行后，根据最优组合模型中环境因子的综合贡献率结果显示（图 2：C），影响喜旱莲子草地理分布最主要的环境变量为气候因子，综合贡献率最高的环境因子是年均温变化范围（bio7），其综合贡献率为 27.5%。其次是植被归一化指数（ndvi）、最暖月最高温度（bio5）和最暖季度降水量（bio18）。



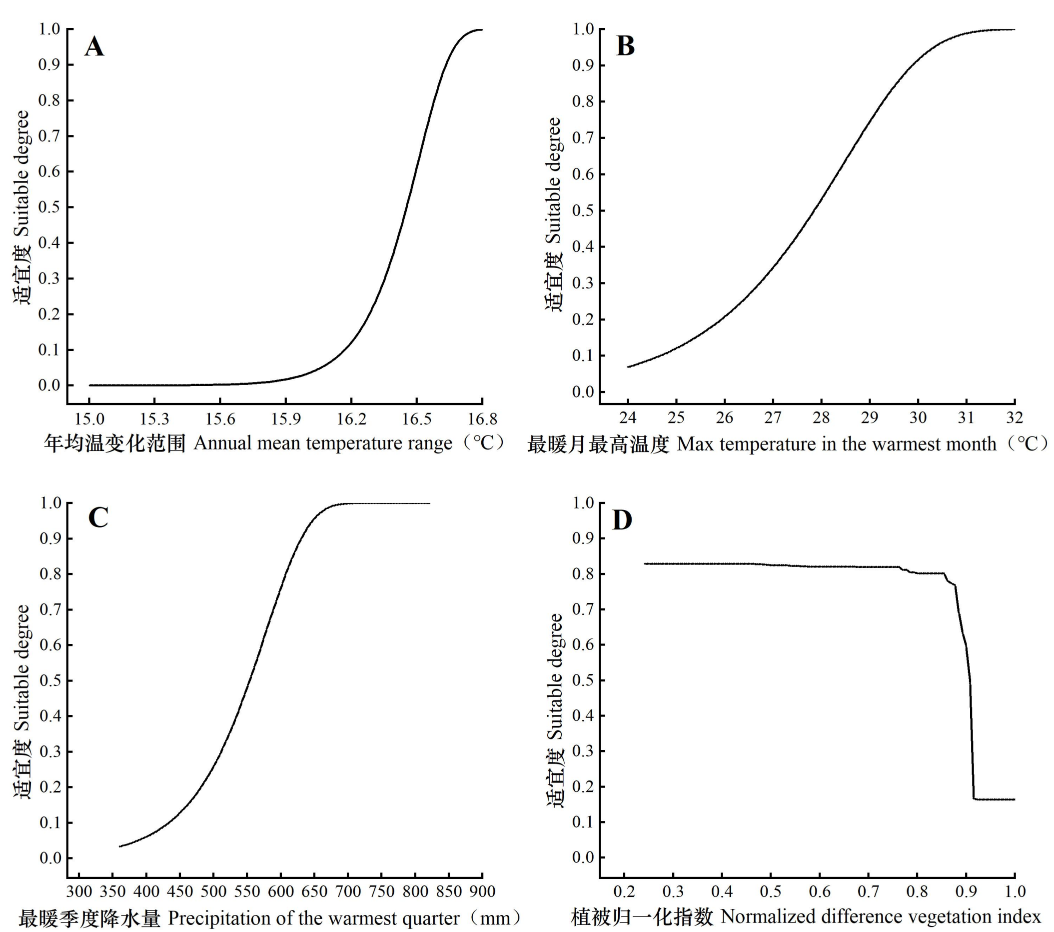
A. 筛选后 11 个环境因子相关性分析；**B**. 单一模型 TSS 与 AUC 值比较；**C**. 环境因子对组合模型的综合贡献率。A 图和 C 图中环境变量含义见表 1；**TSS**. 真实技巧统计值；**AUC**. 受试者工作特征曲线下面积；**ANN**. 人工神经网络模型；**CTA**. 分类树分析模型；**FDA**. 柔性判别分析模型；**GBM**. 推进式回归树模型；**GLM**. 广义线性模型；**MARS**. 多元适应回归样条函数；**MAXENT**. 最大熵模型；**RF**. 随机森林模型；**SRE**. 表面分布区分室模型。

A. Correlation analysis of 11 environmental factors after screening; **B**. Comparison of single model TSS and AUC values; **C**. Importance weights of environmental factors for the combined model. The meanings of the environment variables in the diagrams A and C are shown in Table 1; **TSS**. True skill statistic; **AUC**. Area Under Curve; **ANN**. Artificial neural network model; **CTA**. Classification tree analysis model; **FDA**. Flexible discriminant analysis model; **GBM**. Propulsive regression tree model; **GLM**. Generalised linear model; **MARS**. Multivariate adapted regression spline function; **MAXENT**. Maximum entropy model; **RF**. Random forest model; **SRE**. Surface distribution distinguished room model.

图 2 模型筛选与环境变量评估

Fig. 2 Model screening and assessment of environmental variables

环境因子响应曲线能够反映环境变量对生境适宜度的影响（方铧等，2023），当变量范围对应适宜度> 0.5 时被认定为最适合物种的生存（Ren et al., 2020）。在模型的运行结果中，bio7、bio5 和 bio18 对于喜旱莲子草适宜度整体的响应曲线均呈倒“S”型。具体而言，喜旱莲子草的适宜度在年均温变化介于 16.5~16.8 ℃内保持较高水平，当年均温变化降低至 16.5 ℃以下时适宜性开始下降，降至 15.9 ℃以下时，适宜性几乎完全丧失（图 3：A）。对于最暖月最高温度变化，最适宜性范围为 27.8~31.2 ℃，当温度范围下降至 27.8 ℃后适宜度开始下降，当温度范围下降至 24 ℃以下时适宜度几乎为 0（图 3：B）。此外，喜旱莲子草的最适宜性在最暖季度降水量介于 520~710 mm 范围内，降水量减少至 520 mm 以下时适宜性开始下降，进一步降低至 380 mm 以下时，其适宜性几乎为 0（图 3：C）。ndvi 响应曲线则显示，当 ndvi 数值处于 0.2~0.8 时，喜旱莲子草的整体适宜度保持在约 0.8 的水平，并呈现出持续平缓且略微下降的趋势；而当 ndvi 数值从 0.8 增加到 1.0 时，喜旱莲子草的适宜度则急速下降（图 3：D）。



A. 环境因子 bio7 的响应曲线；**B**. 环境因子 bio5 的响应曲线；**C**. 环境因子 bio18 的响应曲线；**D**. 环境因子 ndvi 的响应曲线。

A. Response curve for environmental factor bio7; **B**. Response curve for environmental factor bio5; **C**. Response curve for environmental factor bio18; **D**. Response curve for environmental factor ndvi.

图 3 主要环境变量的响应曲线

Fig. 3 Response curves for major environmental variables

2.2 当前气候下喜旱莲子草分布区域

结果表明，当前气候下喜旱莲子草的低度适宜面积为 3 452.81 km^2，中度适宜面积为 635.45 km^2，高

度适宜面积为 149.95 km²，非常适宜面积为 30.80 km²。其潜在适生区主要包括鹦哥岭片区、黎母山片区、吊罗山片区、五指山、霸王岭及尖峰岭管辖边缘区域（图 4）。其中，喜旱莲子草的高适生区主要集中在鹦哥岭片区、黎母山片区北部及吊罗山片区南部一般控制区边缘的河流经过流域。国家公园其他几个片区边界的河流或水库经过流域也零散的存在有喜旱莲子草的中度适生区。低适生区域总体位于国家公园核心区域内。

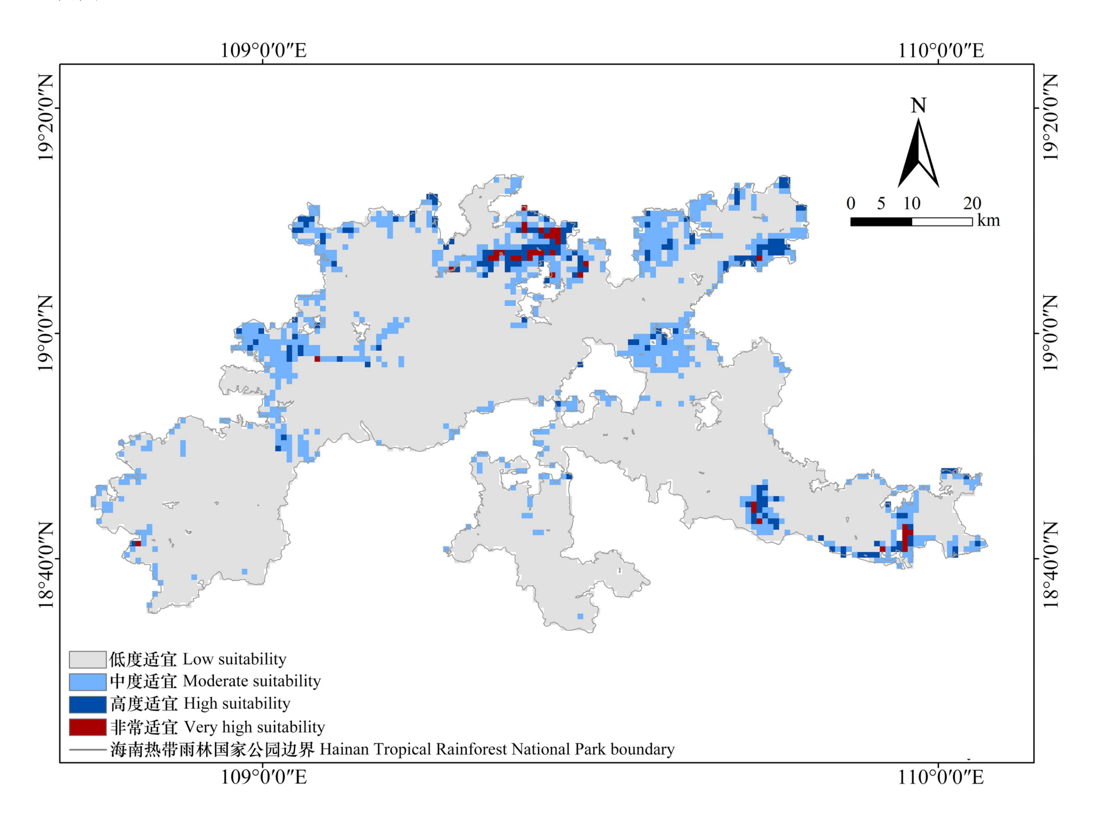


图 4 海南热带雨林国家公园内喜旱莲子草潜在适生分布

Fig. 4 Potential distribution of *Alternanthera philoxeroides* in Hainan Tropical Rainforest National Park

2.3 未来气候下喜旱莲子草分布区域

未来 2 种气候情景下（SSP126、SSP585），喜旱莲子草总适生区面积呈现出两种不同的趋势（图 5）。具体而言，在当前气候条件下，喜旱莲子草总适生区面积为 816.19 km²。在 2050s 时期 SSP126 情景下，总适生区面积减少至 519.54 km²，同时损失率高达 53.62%，显示出一定区域的收缩，表明在此气候情景下喜旱莲子草分布范围有较大的收缩。相比之下，SSP585 情景总适生区面积增长至 1 096.63 km²，增益率达 64.35%，而损失率为 29.99%，显示其适生区有一定程度扩展，说明 2050s 时期 SSP585 气候情景下更适合喜旱莲子草扩张。在 2070s 时期，两种情景下喜旱莲子草总适生区面积均呈现出较大幅度的增加，显示出一定的扩张趋势。至 2090s 时期，喜旱莲子草的适生区变化更为显著。在 SSP126 情景下，喜旱莲子草总适生区面积收缩至 495.23 km² 且低于当前时期。收缩面积为 393.91 km²，损失率提升至 48.26%，显示在此气候情景下部分区域不适宜喜旱莲子草生长。而 SSP585 情景中总适生区面积达到最高值 3 147.24 km²，成为所有情景中的最大值，损失率仅为 1.69%，几乎可以忽略不计，这说明在 2090s 时期 SSP585 气候情景下最适合喜旱莲子草扩张，凸显了极端气候条件下该入侵物种分布的快速适应和扩张能力。

综上所述，在不同时期和不同气候情景下，喜旱莲子草的适生区均表现出明显的变化规律和趋势。在 SSP126 情景下（除 SSP126—2070s），喜旱莲子草的适生区相较于当前时期均出现一定程度收缩，表明在此气候下部分区域不适宜其生长。但是相比于 SSP126 情景，SSP585 情景作为较为严峻的气候变化

情景，喜旱莲子草的扩张速度较为迅猛。尤其在极端气候情景下表现出极强的扩张能力（表 2）。

本研究还计算了喜旱莲子草在不同情景下的总适生区质心变化，发现在未来气候情景下，在南北方向上，喜旱莲子草在两种情景下呈现出相反的移动趋势，在 SSP126 情景下喜旱莲子草围绕当前分布质心点呈上下摇摆趋势，SSP585 情境下质心点总体呈南移趋势；在东西方向上，主要呈现出一种东移趋势（图 6）。

表 2 不同时期不同气候情景下喜旱莲子草适生区的变化

Table 2 Changes in the suitable habitats of *Alternanthera philoxeroides* under different climate scenarios in different periods

时期 Period	气候情景 Climate scenario	总适生区面积 Total suitable area（km^2）	收缩面积 Loss area（km^2）	扩张面积 Expansion area（km^2）	保留面积 Reserved area（km^2）	损失率 Percentage of loss（%）	增益率 Percentage of gain（%）
当前 Current	—	816.19	—	—	—	—	—
2050s	SSP126	519.54	437.68	131.30	315.29	53.62	16.09
	SSP585	1 096.63	244.78	525.22	570.60	29.99	64.35
2070s	SSP126	1 347.08	209.92	717.31	549.53	25.72	87.89
	SSP585	1 576.46	109.42	827.54	639.50	13.41	101.39
2090s	SSP126	495.23	393.91	91.59	353.39	48.26	11.22
	SSP585	3 147.24	13.78	2 354.56	731.09	1.69	288.48

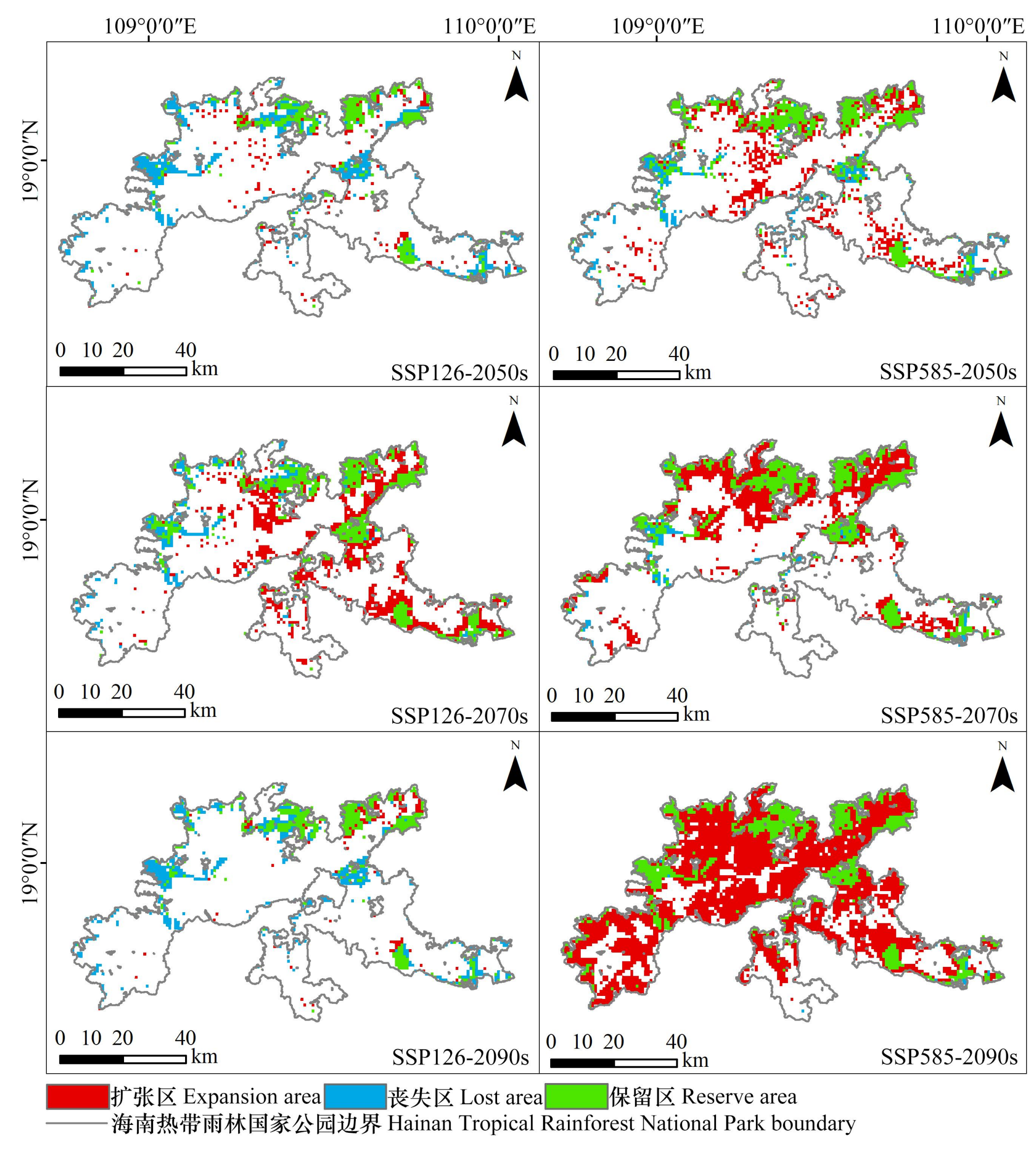


图 5 不同气候情景下喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园内的分布格局变化

Fig. 5 Changes in the distribution pattern of *Alternanthera philoxeroides* in Hainan Tropical Rainforest National Park under different climate scenarios

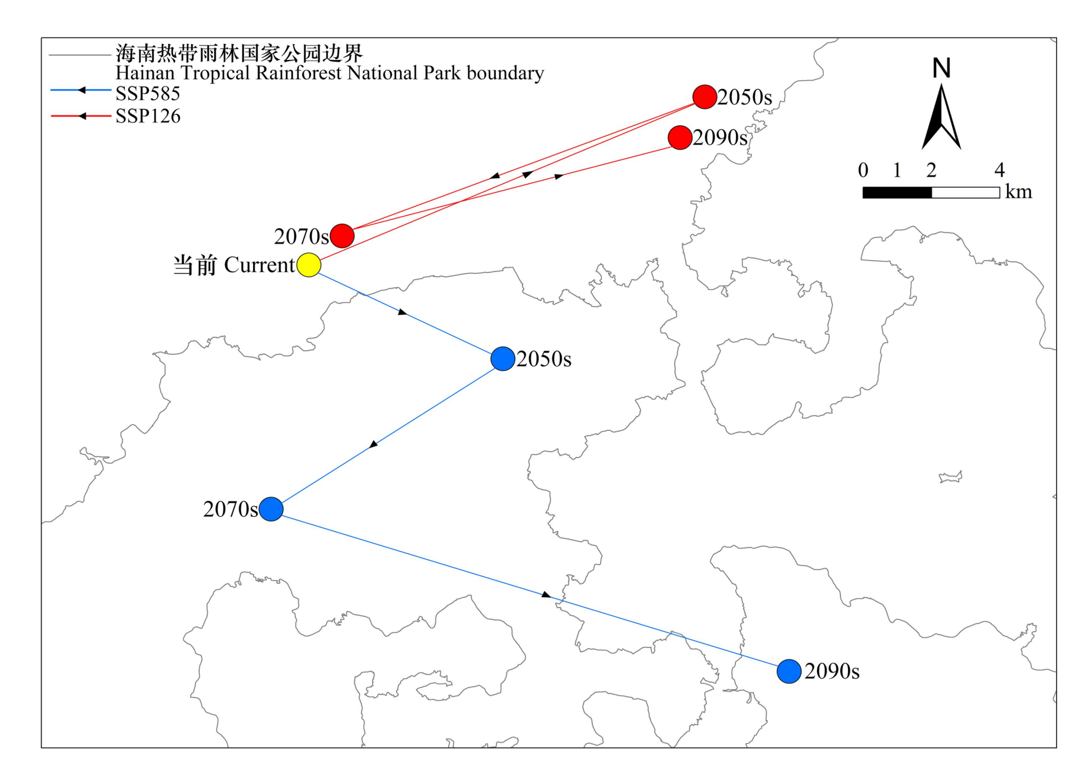


图 6 不同气候情景下喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园内质心的迁移路线

Fig. 6 Migration routes of *Alternanthera philoxeroides* in the centre of mass of Hainan Tropical Rainforest National Park under different climate scenarios

3 讨论与结论

3.1 喜旱莲子草的现有潜在分布预测及影响因素分析

运用 Biomod2 和 Arcgis 技术，结合实地调查数据，预测海南热带雨林国家公园内喜旱莲子草的潜在分布区域，相对于标本数据更精准反映入侵植物的实际分布现状，构建模型的 TSS 和 AUC 值均达优秀标准之上，验证了模型预测结果的准确性和可靠性。

研究结果表明，在当前气候条件下，喜旱莲子草的潜在适生区域主要分布于海南热带雨林国家公园的边界区域。喜旱莲子草的适生区域从国家公园的一般控制区到核心区呈现出递减的梯度变化特征。尤其是国家公园内各类水库或靠近边界村落的河流湖泊流域，被预测为高度适生区，这一预测结果与野外实际调查结果基本保持一致。在当前气候条件下，喜旱莲子草形成现有分布格局主要涉及国家公园边界区域的地理环境、人为活动干扰以及核心区域的天然生态抗性等因素。首先，国家公园位于海南中部山区，其边界与周边村落、农田及交通干道相邻。当地原住居民对土地的高度依赖以及频繁的人类活动（刘阳，2023），对生态环境造成了一定程度的干扰，为喜旱莲子草的入侵提供了条件。此外，这些区域内分布有多条河流和水库，如鹦哥岭片区的南渡江和黎母山片区的坡生水库等，形成了湿润的微气候和充足的水源条件，使土壤湿度长期维持在较高水平，从而为喜旱莲子草的生长提供了理想的高湿度生境。相关研究表明，喜旱莲子草在河流、湖泊等养分和水分充足的生态系统中具有较强的入侵和定殖能力，其相对盖度可超过 90%，从而成为群落中的优势物种（王颖等，2015）。这种生境条件为喜旱莲子草的繁殖和扩散提供了良好的基础，促进了其在该区域的种群扩展。其次，国家公园的核心区域作为生态保护的重点，植物群落多样性较高，生态系统较为稳定（李霖明，2022）。与边界区域相比，核心区域通常具有较强的天然抗性，使得喜旱莲子草难以突破天然生态屏障进入核心区域，从而形成了从边界向核心区递减的分布格局。因此，相较于国家公园内部人为干扰少、植被密度大的核心区域，喜旱莲子草的

适生区更多集中在国家公园的边界区域。

赵彩云等（2022）研究显示，在国家级自然保护区、省级及县域尺度等不同空间尺度下，气候因素是影响外来入侵植物分布格局的关键因素。本研究的预测结果也表明，年均温变化范围（bio7）、最暖月最高温度（bio5）以及最暖季度降水量（bio18）对喜旱莲子草的分布格局具有显著影响。关键气候因子的响应曲线同时揭示了喜旱莲子草的适宜度随这些气候变量的降低而呈现下降趋势。此外，除气候因素外，植被归一化指数（ndvi）也对喜旱莲子草的分布格局具有显著影响。其响应曲线表明在较宽泛的数值范围内，喜旱莲子草能够维持较高的适宜度。仅当 ndvi 值趋近于 1 时，可能会因竞争加剧或水分及养分供应紧张等因素，进而对喜旱莲子草的生长与繁殖产生影响。这或许与喜旱莲子草在面对环境压力时具有一定的生理适应性和可塑性相关。相关研究表明，喜旱莲子草地下资源的竞争能力随种群密度增加而增强，且地上部分面对环境压力具备较强的调节能力，可使喜旱莲子草最大限度捕获潜在可利用资源，提升环境适应力，这对于喜旱莲子草在竞争条件下维持种群存续具有重要意义（王渟渟等，2022）。为准确预测喜旱莲子草在不同时期的潜在地理分布，本研究除气候因子外，增加了地形、土壤、太阳辐射量等因子。根据预试验结果，土壤因子中沙含量、土壤酸碱度、土壤碳氮比的贡献率最高。相关研究也曾表明，喜旱莲子草更容易在土壤有机质、全氮含量高而 pH 低的生境中成为优势种（张丽苗等，2022）。地形的变化也会间接影响土壤以及光照等条件，从而影响喜旱莲子草的分布（陈立立等，2008）。因此，预测物种适生区域时需全面考虑对物种地理分布产生影响的环境因素。

3.2 未来气候变化下喜旱莲子草的扩散趋势分析

对比当前时期，在未来气候的 SSP126 和 SSP585 两种情景下，喜旱莲子草的总适生区面积呈现出不同的变化趋势。在 SSP126 情景下，喜旱莲子草整体的适生面积较当前时期呈现减少状态，趋势为“减少-增加-减少”。与 SSP126 情景相比，在 SSP585 情景下所预测的喜旱莲子草未来适生面积会显著扩增。同一时期下，SSP585 情景预测的适生面积均大于 SSP126 情景预测结果，且相较于当前时期均呈现明显扩增趋势。尤其在 2090s 时期，SSP585 情景下喜旱莲子草的适生面积急剧扩张。魏玉坤等（2023）对喜旱莲子草的全球分布进行预测，结果表明全球气候变暖会对喜旱莲子草所生存的陆地和水生生态系统造成巨大影响。尽管国家公园内部丰富的物种多样性展现出较高的自然防御屏障，使得外来入侵植物难以成功建立种群。然而，喜旱莲子草作为水陆两生的草本植物，兼具独特生物学特性与广泛生态位适应性。一方面能依据不同环境灵活调整形态与生长发育，另一方面对温度梯度呈现出强表型可塑性，相较其他植物竞争优势显著（王颖等，2015；田德锋等，2022）。面对未来日益频发的极端气候事件及全球气候模式的显著变化，国家公园内的相关水域与陆地生态系统将成为喜旱莲子草新的扩散区域。

结合喜旱莲子草的生物学特性和扩散趋势分析结果，在未来气候变化，尤其是全球气候变暖趋势加剧和极端天气频发的影响下，该物种在海南热带雨林国家公园中存在进一步扩散的风险。面对这一挑战，国家公园管理机构需对这类扩散繁殖力极强的外来入侵植物采取一系列综合、前瞻且科学的措施，以确保生态系统的健康和可持续发展。本研究针对气候变化背景下喜旱莲子草在国家公园内的潜在扩散风险进行了预测，并指出其潜在风险区的扩增面积显著增加，有持续扩散的态势。因此，未来仍需在国家公园内部继续实施入侵物种调查，进行生态风险评估，并深入调查相关入侵植物对国家公园内部生物多样性和当地植物群落的影响。本研究结果将为喜旱莲子草在海南热带雨林国家公园的预警、监测和防治工作提供科学参考。

参考文献：

ALLOUCHE O, KADMON TR, 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS) [J]. Journal of Applied Ecology, 43(6): 1223-1232.

CAI YL, ZHU HG, LI JX, 2024. Biodiversity conservation in China: Policy evolution, main measures and

development trends [J]. Biodiversity Science, 32(5): 25-34. [蔡颖莉，朱洪革，李家欣，2024. 中国生物多样性保护政策演进、主要措施与发展趋势 [J]. 生物多样性，32(5)：25-34.]

CHEN J, WANG SH, ZHU F, et al., 2021. Risk evaluation of *Tithonia diversifolia* dispersal in Yunnan Province [J]. Guihaia, 41(5): 789-798. [陈剑，王四海，朱枫，等，2021. 外来入侵植物肿柄菊在云南的扩散风险研究 [J]. 广西植物，41(5)：789-798.]

CHEN LL, YU Y, HE XJ, 2008. Historical invasion and expansion process of *Alternanthera philoxeroides* and its potential spread in China [J]. Biodiversity Science, 16(6): 578-585. [陈立立，余岩，何兴金，2008. 喜旱莲子草在中国的入侵和扩散动态及其潜在分布区预测 [J]. 生物多样性，16(6)：578-585.]

CHEN Q, KONG MY, SUN QF, et al., 2022. Prediction of *Huperzia serrata* suitable region based on ensemble model in China [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 42(3): 492-501. [陈勤，孔梦盈，孙奇芳，等，2022. 基于组合模型预测蛇足石杉在中国的适生区 [J]. 西北植物学报，42(3)：492-501.]

DU LS, LIU HO, LIU WH, et al., 2023. Spatial and temporal variation of water conservation and driving factor analysis in tropical rainforests: a case study of Hainan Tropical Rainforest National Park [J]. Research of Environmental Sciences, 36(9): 1716-1727. [杜乐山，刘海鸥，刘文慧，等，2023. 热带雨林区水源涵养服务时空演变及驱动因素分析：以海南热带雨林国家公园为例 [J]. 环境科学研究，36(9)：1716-1727.]

FANG H, CHEN XT, LIU MY, et al., 2023. Analysis on the potential habitat suitability of *Spartina alterniflora* based on Maxent model [J]. Acta Agrestia Sinica, 31(11): 3514-3524. [方铧，陈星彤，刘明月，等，2023. 基于 Maxent 模型的互花米草潜在生境适宜性分析 [J]. 草地学报，31(11)：3514-3524.]

GONG L, LI JS, LIU XY, et al., 2017. Analysis of invasive alien species in Chinese national nature reserves [J]. Ecological Science, 36(4): 210-216. [宫璐，李俊生，柳晓燕，等，2017. 我国部分国家级自然保护区外来入侵物种的分布概况 [J]. 生态科学，36(4)：210-216.]

HOU QC, FENG YL, ZHOU YJ, et al., 2022. Main hypotheses on mechanisms underlying plant invasion: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 33(11): 3105-3115. [侯清晨，冯燕楼，周玉洁，等，2022. 植物入侵机制的主要假说 [J]. 应用生态学报，33(11)：3105-3115.]

HUANG DY, AN QJ, HUANG SP, et al., 2023. Biomod2 modeling for predicting the potential ecological distribution of three *Fritillaria* species under climate change [J]. Scientific Reports, 13(1): 18801.

JIAO XY, LI JY, YANG OY, et al., 2024. Spread dynamics and driving factors of alien invasive plant *Solidago canadensis* in Hubei Province [J]. Guihaia, 44(8): 1481-1494. [焦鑫宇，李嘉谊，杨清玉，等，2024. 入侵植物加拿大一枝黄花在湖北的扩散动态和影响因素研究[J]. 广西植物，44(8)：1481-1494.]

LI LM, 2022. Analysis of Landscape Pattern and Spatio-temporal change for ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park [D]. Haikou: Hainan University. [李霖明，2022. 海南热带雨林国家公园景观格局及生态系统服务价值时空变化分析 [D]. 海口：海南大学．]

LI SC, GAO JB, 2008. Prediction of spatial distribution of *Eupatorium adenophorum* sprengel based on GARP model: a case study in longitudinal range-gorge region of Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 27(9): 1531-1536. [李双成，高江波，2008. 基于 GARP 模型的紫茎泽兰空间分布预测——以云南纵向岭谷为例 [J]. 生态学杂志，27(9)：1531-1536.]

LIANG JM, JANG QL, JANG L, et al., 2023. Predicting the potential geographical distribution of *Manglietia pachyphylla* in China under climate change based on Maxent model [J]. Guangxi Sciences, 30(6): 1133-1143. [梁键明，蒋庆莲，姜垒，等，2023. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下厚叶木莲在中国的潜在地理分布 [J]. 广西科学，30(6)：1133-1143.]

LIU Y, 2023. Research on ecological protection and governance of Hainan Tropical Rainforest National Park [J]. Resources and Habitant Environment, 39(7): 61-64. [刘阳，2023. 海南热带雨林国家公园生态保护治理研

究 [J]. 资源与人居环境，39(7)：61-64.]
LIU YJ, LIU MY, LI J, et al., 2024. Prediction of diffusion trend of invasive plant *Spartina Alterniflora* based on ANN-CA [J]. Ecology and Environmental Sciences, 33(3): 341-350. [刘亚静，刘明月，李京，等，2024. 基于 ANN-CA 的外来入侵植物互花米草的扩散趋势预测研究 [J]. 生态环境学报，33(3)：341-350.]
Ministry of Environmental Protection of the People' s Republic of China, 2003. Notice on the release of the first list of invasive alien plants in China [EB/OL]. (2003-01-10) [2024-12-07]. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172155.htm. [国家环保总局，2003. 关于发布中国第一批外来入侵物种名单的通知 [EB/OL]. (2003-01-10) [2024-12-07]. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172155.htm.]
Ministry of Environmental Protection of the People' s Republic of China, 2021. Report on the State of the Ecology and Environment in China 2020 [EB/OL]. (2021-05-26) [2024-12-07]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf. [中华人民共和国生态环境部，2021. 2020 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. (2021-05-26) [2024-12-07]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf.]
PHILLIPS JS, ANDERSON PR, SCHAPIRE ER, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 190(3/4): 231-259.
QIN Z, ZHANG J, JIANG Y, et al., 2018. Invasion process and potential spread of *Amaranthus retroflexus* in China [J]. Weed Research, 58(1): 57-67.
RAI KP, SINGH J, 2020. Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health [J]. Ecological Indicators, 111: 106020.
REN ZC, ZAGORTCHEV L, MA JX, et al., 2020. Predicting the potential distribution of the parasitic *Cuscuta chinensis* under global warming [J]. BMC Ecology, 20(1): 28.
SEGURADO P, ARAÚJO BM, 2004. An evaluation of methods for modelling species distributions [J]. Journal of Biogeography, 31(10): 1555-1568.
SHAO XM, 2024. The impact of tourism activities on plant communities and diversity in nature reserves [J]. Molecular Plant Breeding, 22(18): 6184-6189. [邵小明，2024. 旅游活动对自然保护区植物群落及多样性的影响 [J]. 分子植物育种，22(18)：6184-6189.]
TANG ME, ZHANG QY, ZHANG YC, 2020. Warming affects the invasion ability and competitiveness of the invasive plant *Alternanthera philoxeroides* [J]. Pratacultural Science, 37(6): 1047-1057. [唐梦娥，张桥英，张运春，2020. 增温对喜旱莲子草入侵和竞争力的影响 [J]. 草业科学，37(6)：1047-1057.]
TIAN DF, LI GY, ZHANG WJ, 2022. Characteristic of climatic niche of *Alternanthera philoxeroides* and its shift in invasion [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 61(2): 135-145+157. [田德锋，李耕耘，张文驹，2022. 喜旱莲子草气候生态位的特征及在入侵过程中的变化 [J]. 复旦学报（自然科学版），61(2)：135-145+157.]
WANG R, WANG YZ, 2006. Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China [J]. Diversity Distributions, 12(4): 397-408.
WANG TT, ZHANG QY, ZHANG YC, et al., 2022. Density dependence and growh trade-off *Alternanthera philoxeroides* under warming [J]. Acta Eologica Sinica, 42(22): 9100-9110. [王渟渟，张桥英，张运春，等，2022. 喜旱莲子草在增温背景下的密度制约与生长权衡 [J]. 生态学报，42(22)：9100-9110.]
WANG Y, LI WH, LI D, et al., 2015. Research progress on invasion mechanism and prevention strategy of *A lternanthera philoxeroides* [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 32(4): 625-634. [王颖，李为花，李丹，等，2015. 喜旱莲子草入侵机制及防治策略研究进展 [J]. 浙江农林大学学报，32(4)：625-634.]

WANG YS, 2007. Application of niche models in the risk assessment of invasive alien species [D]. Changsha: Hunan Agricultural University. [王运生，2007. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究 [D]. 长沙：湖南农业大学．]

WANG ZW, YIN J, WANG X, et al., 2023. Habitat suitability evaluation of invasive plant species *Datura stramonium* in Liaoning Province: based on Biomod2 combination model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 34(5): 1272-1280. [王子文，尹进，王星，等，2023. 辽宁省入侵植物曼陀罗的生境适宜性评价——基于 Biomod2 组合模型 [J]. 应用生态学报，34 (5)：1272-1280.]

WEI YK, MEN YL, ZHU GP, 2023. Impact of global climate change on potential distributions of *Alternanthera philoxeroides* and *Agasicles hygrophila* [J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition) , 43(2): 28-33. [魏玉坤，门永亮，朱耿平，2023. 全球气候变化对喜旱莲子草和莲草直胸跳甲潜在分布的影响 [J]. 天津师范大学学报（自然科学版），43(2)：28-33.]

WU T, SHEN K, JIA T, et al., 2024. Ecological effects of the exotic plant *Tithonia diversifolia* on invasive habitats and its control strategies [J]. Journal of Biosafety, 33(1): 7-11+37. [吴甜，申科，贾涛，等，2024. 外来植物肿柄菊对入侵生境的生态影响及其防控对策 [J]. 生物安全学报（中英文），33(1)：7-11+37.]

ZHANG HB, ZHANG Y, 2024. The impact of human activitieson riparian wetland plant communities [J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition) , 46(6): 88-97. [张慧斌，张翼，2024. 人类活动对河岸湿地植物群落的影响 [J]. 西南大学学报（自然科学版），46(6)：88-97.]

ZHANG LM, TAN X, DONG Z, et al., 2022. Effects of *Alternanthera philoxeroides* invasion on plant diversity in the riparian zones of downtown Chongqing in the three gorges reservoir area [J]. Acta Prataculturae Sinica, 31(9): 13-25. [张丽苗，谭雪，董智，等，2022. 喜旱莲子草入侵对三峡库区重庆主城河岸带植物多样性的影响 [J]. 草业学报，31(9)：13-25.]

ZHANG YL, SONG XJ, CHEN XY, et al., 2023. A study on the invasive status of alien plants in the Giant Panda National Park: a case study of Changqing and Taibai Mountain National Nature Reserves in Shaanxi Provincel [J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition) , 51(3): 96-108. [张莹璐，宋兴江，陈晓艳，等，2023. 大熊猫国家公园外来植物入侵现状——以陕西长青、太白山国家级自然保护区为例 [J]. 陕西师范大学学报（自然科学版），51(3)：96-108.]

ZHAO CY, LIU XY, LI FF, et al., 2022. The distributon pattem and determinant facors of the man invasive alien plants in national nature reserves in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 42(7): 2532-2541. [赵彩云，柳晓燕，李飞飞，等，2022. 我国国家级自然保护区主要外来入侵植物分布格局及成因 [J]. 生态学报，42 (7)：2532-2541.]

ZHAO GH, CUI XY, SUN JJ, et al., 2021. Analysis of the distribution pattern of Chinese *Ziziphus jujuba* under climate change based on optimized biomod2 and Maxent models [J]. Ecological Indicators, 132: 108256.

ZHUO ZH, XU DP, PU B, et al., 2020. Predicting distribution of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. in China [J]. BMC Ecology, 20(1): 46-46.